ENSAMBLAJE Y CONTROL DE UN ROBOT DE TRES GRADOS DE LIBERTAD TIPO SCARA (SELECTIVE COMPLIANCE ASSEMBLY ROBOT ARM)

Yadira Boada Acosta

Luis Morales Escobar

Nelson G. Sotomayor O, Msc.

Profesor Principal T/C

Escuela Politécnica Nacional - Ecuador

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto el ensamblaje de todos los componentes de un robot SCARA de tres grados de libertad, además del diseño de sus piezas y estudio de materiales. El Robot SCARA cuenta con tres eslabones unidos por dos articulaciones de tipo revoluta y una prismática, las cuales le proporcionan la movilidad al manipulador. Abarca un espacio de trabajo planar XY cuyos límites varían desde los puntos (-14,14)cm hasta (-14,-14)cm formando un medio arco, y su tercera articulación prismática, hace que el efector final, en este caso una pinza controlada por dos servomotores, se deslice verticalmente en el plano Z, hasta alcanzar su objetivo.

Mediante técnicas de control PID para los tres motores de DC que representan las articulaciones, se ha buscado la regulación y seguimiento de tareas definidas por el programador, como son: la colocación del efector final en una posición deseada y la generación de trayectorias previamente establecidas; todo esto mediante el uso de programación en alto nivel y una interfaz de usuario en la PC, que se comunica con el robot SCARA, a través de una tarjeta de adquisición de datos.

1. INTRODUCCIÓN

La arquitectura de robots tipo SCARA, está equipada de libertad total de movimientos en los ejes X y Y pero limitados severamente en sus desplazamientos en el eje Z. Es decir, permite ubicar el extremo de la pinza en cualquier lugar pero siempre sobre el plano de trabajo. En el eje vertical Z solo se realizan manipulaciones simples que habitualmente consisten en presionar y desplazarse unos pocos centímetros.

Los SCARA son de estructura ergonómica y su control es relativamente simple, combinando así, su versatilidad física y su programación con un moderado grado de complejidad debido a que no poseen demasiados grados de libertad, convirtiéndose en los favoritos en cuanto a aplicaciones industriales se refiere.

Estos manipuladores son una opción diseñada y ampliamente utilizada, en tareas tales como soldadura, pulida, atornillada, clasificación de productos, fabricación de productos de electrónica de consumo, entre otras, propias del sector productivo, donde el ser humano debe desarrollar labores más complejas y aprovechar al máximo las bondades que los prototipos robóticos ofrecen.

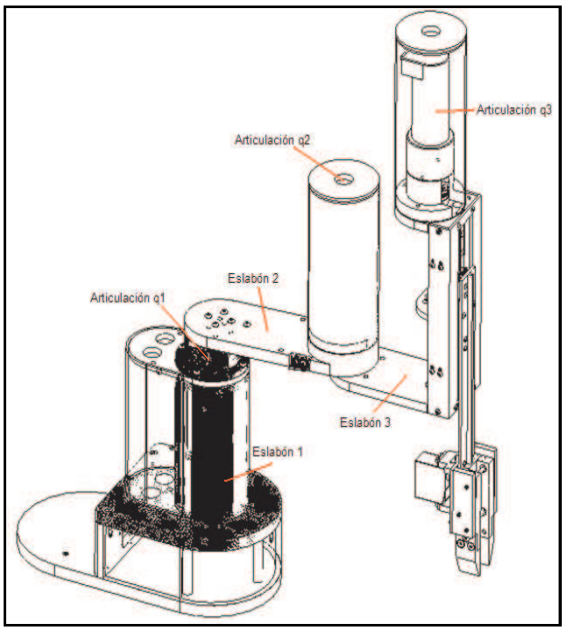


Figura 1. Robot SCARA, tomado de [1]

2. MODELO GEOMÉTRICO DIRECTO DEL ROBOT SCARA

En cualquier instante de tiempo, la posición del efector final del robot es $qi=[\theta_1,\theta_2,q_3]^T$ y existen varias formas para localizar a cada uno de los eslabones del robot. Se requieren parámetros de traslación y de rotación que deben ser obtenidos en base a la trayectoria o posición deseada, dependiendo también de la geometría propia del robot SCARA. El Modelo Geométrico Directo (MGD) permite, calcular las coordenadas de rotación o ángulos a moverse $q_1,q_2,\ldots,q_n$ (n depende del número de grados de libertad), utilizando los pares de puntos cartesianos (x,y) a los que el efector final debe llegar. Una de estas técnicas se conoce como Transformación de Matrices Homogéneas, formada por una matriz de rotación y otra de traslación como se muestra en la ecuación (1) [2].

$$
{}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1)
$$

Escalador — Rotación 3x3 — Traslación 3x1

donde, $C\theta = \cos\theta$, $S\theta = \operatorname{sen}\theta$

Utilizando el Algoritmo de Denavit - Hartenberg se establece los parámetros α, θ, d y a, requeridos para la transformación homogénea anterior. De acuerdo a los tres grados de libertad del SCARA, estos parámetros quedan definidos como se muestra en la Tabla 1.

ESLABON	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	q_3	0

Tabla 1. Parámetros del SCARA, usando Algoritmo de D-H

Si se reemplazan estos valores de manera iterativa en la matriz de transformación homogénea (2), se puede obtener fácilmente el modelo geométrico directo del robot, encontrando la posición deseada del elemento terminal (3, 4, 5).

$$
{}^{o}T_3 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & a_3C_{12}+a_2C_1 \\ S_{12} & C_{12} & 0 & a_3S_{12}+a_2S_1 \\ 0 & 0 & 1 & q_3+d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (2)
$$

Posición del actuador

$$P_x = a_3 C_{12} + a_2 C_1 \quad (3)$$
$$P_y = a_3 S_{12} + a_2 S_1 \quad (4)$$
$$P_z = q_3 + d_1 \quad (5)$$

Donde, $C_{12}=\cos(\theta_1+\theta_2)$

3. MODELO GEOMÉTRICO INVERSO DEL ROBOT SCARA

A partir del MGD, se conoce la posición del efector final [Px Py Pz], luego se despejan los ángulos para cada articulación, para obtener expresiones en función de Px, Py y Pz, que definen en cualquier instante, a los ángulos q_1, q_2 y q_3 de las dos primeras articulaciones revoluta, y la tercera de tipo prismática respectivamente; como se muestra en las ecuaciones (6-9).

$$q_3 = P_z - 15 \quad (6)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{P_x+P_y-392}{392}\right) \quad (7)$$

$Si\ x \geq 0,$

$$q_1 = \sin^{-1}\left(\frac{P_y}{+\sqrt[2]{P_x^{\,2}+P_y^{\,2}}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{14\sin(q_2)}{14+14\cos(q_2)}\right) \quad (8)$$

$Si\ x < 0,$

$$q_1 = -\sin^{-1}\left(\frac{P_y}{-\sqrt[2]{P_x^{\,2}+P_y^{\,2}}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{14\sin(q_2)}{14+14\cos(q_2)}\right) \quad (9)$$

Estas ecuaciones representan el Modelo Geométrico Inverso (MGI) del robot SCARA de tres grados de libertad. Basados en la geometría propia del robot, se efectuaron ciertas correcciones necesarias la presente aplicación, obteniendo por ejemplo, un tiempo mínimo de viaje entre la posición inicial y la final. El MGI permite también, la generación de trayectorias utilizando un control cinemático en lazo cerrado, del que se hablará en las siguientes secciones.

4. ESTRATEGIA DE CONTROL

Se implementó un control PID para garantizar un valor de cero en estado estacionario para el error de posición, es decir, la diferencia entre la posición deseada y la calculada por el manipulador. Tomando en cuenta el tipo de actuadores del robot, la señal de control u(t) será un PWM (Pulse Width Modulation) para cada uno de los motores DC, teniendo como mínimo valor de ancho de pulso un 0.1% de su período, debido a la inercia de los motores. La ley de control está definida por la expresión (8) [3].

$$u = W_n^{\,2} e + 2\varepsilon W_n \dot{e} + k_i \int_0^t e\, dt \quad (10)$$

Donde u = señal de control, e = señal de error

La frecuencia natural ω_n está directamente relacionada con la constante Kp o ganancia proporcional. Esta ganancia tiene la característica que aumenta la velocidad del control, además el tiempo de subida es más rápido pero a costa de un mayor sobreimpulso que puede desestabilizar el sistema. La constante de amortiguamiento ξ está irelacionada con el valor de la constante derivativa Kd. Si la constante Kd aumenta, el control es más lento, el sobrepaso decrece y la estabilidad mejora. La constante de integración Ki provoca consecuencias similares que la proporcional.

Para la implementación del lazo de control (ver figura 2) y del controlador PID propiamente dicho, se utilizará el software LabView v.8.6, el cual cuenta con herramientas especiales para su construcción. La sintonización del PID, fue realizada siguiendo las reglas de Ziegler-Nichols puesto que no se cuenta con la función de transferencia de los motores de DC colocados en las articulaciones.

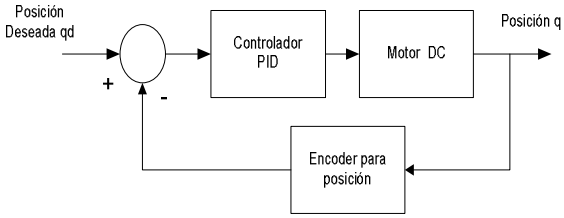


Figura 2. Lazo de control para actuadores de robot

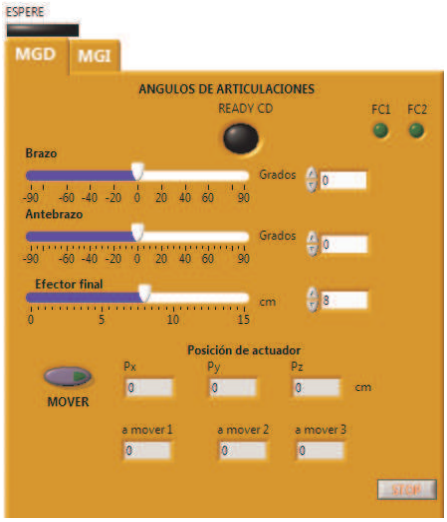
5. DESARROLLO DE LA INTERFAZ DE USUARIO EN LA PC

Para controlar las posiciones y trayectorias seguidas por el robot SCARA, se diseñó mediante LabView v.8.6, una interfaz que cuenta con controles e indicadores para la ejecución de los modelos geométricos Directo e Inverso, mediante datos introducidos por el usuario. Para la comunicación entre la PC y el robot, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos PC-6025E, cuyas entradas y salidas análogas y digitales fueron utilizadas como se indica en la tabla 2.

HARDWARE	TIPO DE ENTRADA	DESCRIPCIÓN
3 Entradas - encoders	Digital	Pulsos enviados que indican la posición del motor
3 Entradas - fines de carrera	Digital	Señal booleana que indica posición final izquierda o derecha
3 Salidas – motores DC	Análogas	Señal tipo PWM para control de motor
6 Salidas – sentido de giro motores DC	Digitales	Señales envidas al manejador de cada motor DC, para controlar sentido de giro

Tabla 2. Distribución de pines de la tarjeta de adquisición de datos

El usuario puede escoger entre dos opciones ya dentro de la interfaz: trabajar en el modo MGD o MGI, uno a la vez, donde se introducen los ángulos q_1, q_2, q_3 o la posición [Px Py Pz] (cm) para el efector final, como se muestra en la figura 3.



a)

b)

Figura 3. Pantallas iniciales de interfaz, a) MGD y b) MGI

Parte de la programación utilizada para componer los dos modelos geométricos, es mostrada en la figura 4, donde se implementaron las ecuaciones vistas en la sección 4, empleando lenguaje C, provisto por un lazo especial para la creación de fórmulas, debido a su rapidez en el cálculo de estas operaciones, tratando en todo momento de disminuir el coste computacional para realizar control en tiempo real.

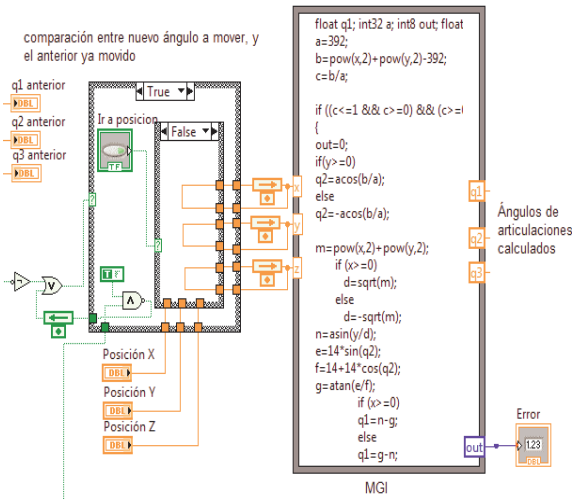


Figura 4. Programación de MGD y MGI

Dentro de la interfaz, se aprecian también las respuestas de los motores DC frente a la señal de entrada o setpoint, que son las posiciones a las que el efector final debe llegar. En la programación, se incluye la construcción del control PID, el cual determina el ancho de pulso que la señal de control PWM debe tener después de calculada la nueva posición, tal como se muestra en la Figura 5.

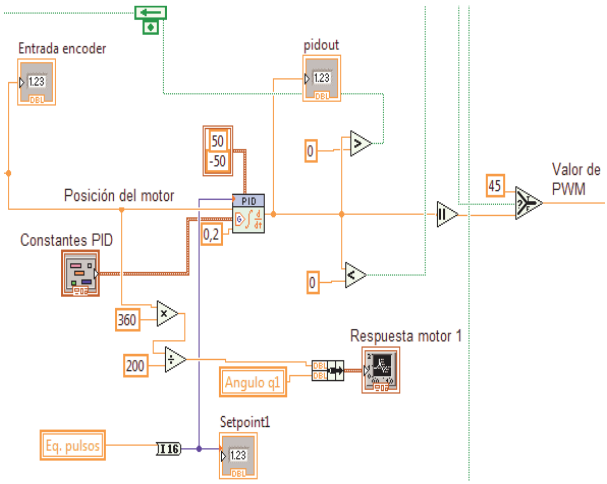


Figura 5. Algoritmo de control PID para el motor DC

Una vez que el controlador PID ha calculado el valor que debe tener el PWM en su ancho de pulso, este dato es enviado al algoritmo de generación de la señal PWM, estableciendo por programación, la frecuencia y el número de muestras según exige su diseño. Este programa se muestra en la Figura 6.

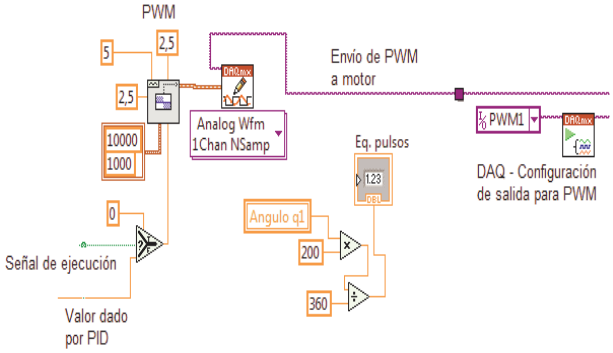


Figura 6. Algoritmo de generación de PWM

6. PRUEBAS DE CONTROL CINEMÁTICO

Para conocer la posición de los actuadores se utilizaron encoders (codificadores de posición), cuya señal presentaba deformaciones, debido a las características inherentes de este elemento y el ruido generado por el motor, como se muestra en la Figura 7. Filtrando esta señal, mediante un circuito comparador en base a un amplificador operacional; se corrigió la señal del encoder y es esta la señal con la que se realizan todos los cálculos en la interfaz de usuario, esta señal se muestra en la Figura 8.

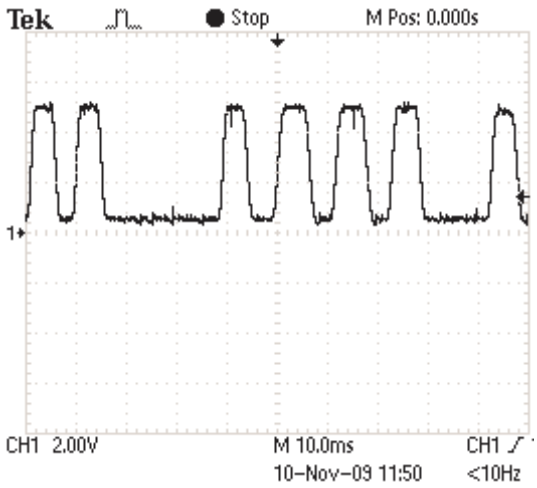


Figura 7. Señal entregada por el encoder

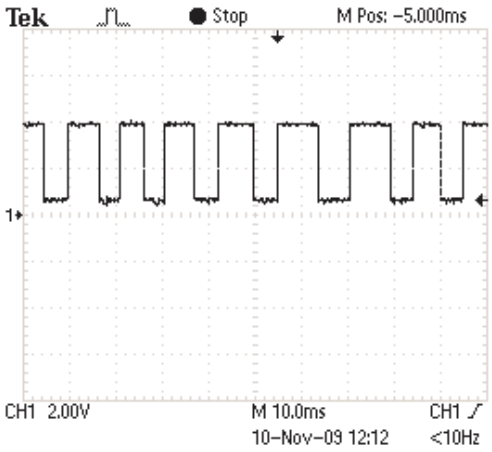


Figura 8. Señal del encoder filtrada

Mediante la sintonización del PID, utilizando las reglas de Ziegler-Nicholds, se corrigió el error de posición, como se muestra en las Figuras 9 y 10, para la respuesta, ante una entrada escalón unitario en el motor de la base o brazo.

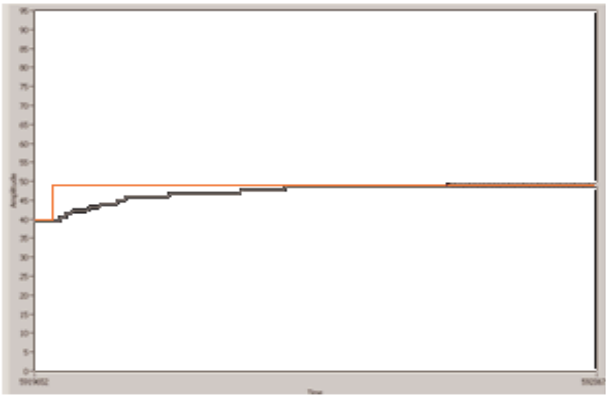


Figura 9. Respuesta paso para motor de la base, antes de la calibración del PID

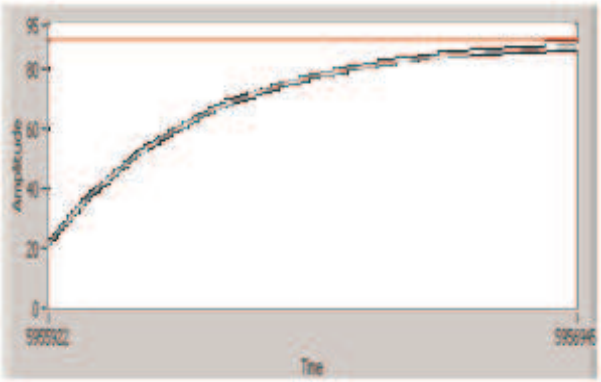


Figura 10. Respuesta paso para motor de la base, después de la calibración del PID

La señal PWM para el control de posición de los motores DC, fue fijada a una frecuencia de 500Hz después de realizadas varias pruebas, debido al cabeceo de los motores DC. Se observó que a frecuencias menores a 100Hz, el voltaje de la fuente de alimentación del sistema fue afectado por los armónicos producidos por el motor y su manejador (conversor DC-DC), mostrando caídas de tensión considerables, como indica la Figura 11.

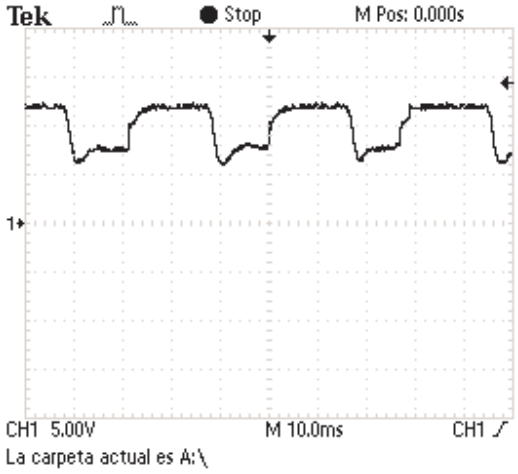


Figura 11. Voltaje distorsionado de la fuente de alimentación

Al establecer una frecuencia de 500Hz para la señal PWM, se disminuyó la distorsión del voltaje de la fuente, resultando una forma de onda casi sin rizado y sin caídas de tensión, como se muestra en la figura 14.

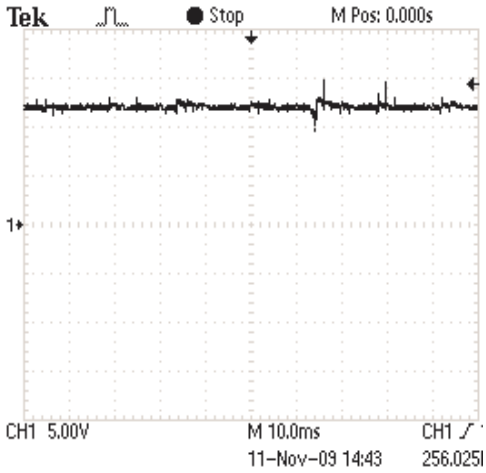


Figura 12. Voltaje de la fuente sin distorsión

7. CONCLUSIONES

- El Algoritmo de Denavit - Hartenberg para la definición de ejes y obtención del modelo

geométrico directo, es una herramienta útil y una forma simplificada de definir los puntos cartesianos de ubicación del efector final. Ingresando los ángulos que se desea que se desplace cada articulación. Después de realizadas las pruebas desde la interfaz de usuario, se observó que uno de los parámetros de este algoritmo (a=longitud del eslabón) debe ser ingresado en la escala definida para el área de trabajo.

- La calibración del controlador PID, fue ardua y minuciosa, puesto que la planta (motor DC) no presentaba oscilaciones sostenidas para ningún valor de Kp, entonces con una primera aproximación del método de Ziegler-Nichols, se probaron diferentes valores de constantes necesarias para el PID, obteniendo mejores resultados con Kp= 5, Ti= 3seg y Td= 0.001seg; disminuyendo considerablemente el error de posición.

- Debido a la alta precisión de este tipo de manipuladores, se vio la necesidad de adquirir como actuadores, motores de DC con caja reductora y encoder diferencial incluido. Este último sistema, permite detectar la posición y el sentido de giro de cada eslabón del robot. Estos son motores de precisión, pues presentan aproximadamente 303 pulsos del encoder por grado a moverse. Esto representa aproximadamente 19000 pulsos por vuelta, permitiéndole al SCARA rotaciones de grado en grado en cualquier posición y trayectoria.

REFERENCIAS

[1] Silva R, Riveros F, Cordero M. "Cuarto Curso Internacional en Robótica Aplicada", Mexico DF, Septiembre 2008

[2] Barrientos A., Peñín L., Balaguer C. "Fundamentos de Robótica", segunda edición. 2007

[3] Ogata K. "Control Automático", 2006

[4] Wisama, Etienne. "Modeling, Identification and Control of Robots". Tercera edición. 2002

[5] National Instruments. "Toolkit PID Manual" . 2009

[6] National Instruments. "LabView 8.6 Manual". 2009

[7] Minchala I. "Curso de Robótica Industrial". EPN, Agosto 2009

BIOGRAFÍAS DE LOS AUTORES

YADIRA BOADA ACOSTA, nació en Quito; el 9 de abril de 1985. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Nacional Eloy Alfaro. En febrero 2009, egresó de Ingeniería Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente, se desempeña como Auxiliar de Laboratorio de Control Y Sistemas, en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la EPN. Sus áreas de interés son: robótica, mecatrónica, instrumentación para la automatización, control de procesos industriales, entre otros. Email: yadiboada@yahoo.com

LUIS MORALES ESCOBAR, nació en Quito; el 14 de enero de 1985. Sus estudios secundarios los realizó en el Colegio Técnico Fiscomisional "Don Bosco". En febrero 2009, egresó de Ingeniería Electrónica y Control de la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente, se desempeña como Auxiliar de Laboratorio de Física, en el Departamento de Ciencias Básicas de la EPN. Sus áreas de interés son: robótica, microcontroladores, automatización de procesos industriales, instrumentación, entre otros. Email: luismoralesldu@hotmail.com

NELSON SOTOMAYOR OROZCO, Nació en Quito el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Además es miembro de la subcomisión académica permanente de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Control.